

ANALYSE DES ABSETZENS KOMPLEXER FALLSCHIRM-LAST-SYSTEME MITHILFE DER MEHRKÖRPERSIMULATION

Wolf R. Krüger

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Aeroelastik, Bunsenstr. 10,
37073 Göttingen, Deutschland

Hauke Schmidt

RWTH Aachen, Institut für Strukturmechanik und Leichtbau, Wüllnerstraße 7
52062 Aachen, Deutschland

Zusammenfassung

Beim Absetzen von Nutzlasten mit Fallschirmen aus der Luft treten in der Regel sehr starken Belastungen während des Aufpralls der abgesetzten Nutzlast auf. Um Aussagen treffen zu können, wie groß die Kräfte und Beschleunigungen bei der Landung werden und wie sie sich bei einer komplexen Last, wie beispielsweise einem Fahrzeug, verteilen, wurden im DLR-Projekt Mitrapor 2 durch das Institut für Aeroelastik Untersuchungen des Landestoßes von komplexen Lastaufbauten mit Hilfe der Methode der Mehrkörpersimulation durchgeführt. Ziele der Arbeiten waren erstens die Erstellung realistischer Mehrkörpermodelle inkl. Palette, Dämpfungselementen und Verzurrung, zweitens die Durchführung und Auswertung von Landestoßrechnungen und drittens die Ermittlung und Optimierung von Dämpfungskonfigurationen, also des Aufbaus und der Anordnung von Dämpfungselementen, um die Kräfte auf die Nutzlast beim Landestoß zu minimieren.

1. AUFPRALLDÄMPFUNG BEI KOMPLEXEN LASTEN

Werden Nutzlasten mit Fallschirmen aus der Luft abgesetzt, führt dies in der Regel zu sehr starken Belastungen während des Aufpralls der abgesetzten Nutzlast. Um Aussagen treffen zu können, wie groß die Kräfte und Beschleunigungen bei der Landung werden und wie sie sich bei einer komplexen Last, wie beispielsweise einem Fahrzeug, verteilen, wurden im DLR Projekt Mitrapor 2 Untersuchungen des Landestoßes von komplexen Lastaufbauten mit Hilfe von Mehrkörpersimulationen (MKS) durchgeführt. Ziele der Arbeiten sind erstens die Erstellung realistischer Mehrkörpermodelle inkl. Palette, Dämpfungselemente und Verzurrung, zweitens die Durchführung und Auswertung von Landestoßrechnungen und drittens die Ermittlung und Optimierung von Dämpfungskonfigurationen, also des Aufbaus und der Anordnung von

Dämpfungselementen, um die Kräfte auf die Nutzlast beim Landestoß zu minimieren. Je nach abgeworfener Nutzlast, von einfachen Containern bis hin zu komplexen Lastkonfigurationen, werden unterschiedliche Dämpfungskonfigurationen und Gurtsystem verwendet. Diese sind durch standardisierte militärische Verfahren dokumentiert. Die in Bild 1 dargestellte Last zeigt den prinzipiellen Aufbau einer für den Lastabwurf konfigurierten Nutzlast, bestehend aus einer Palette, dem Dämpfungsmaterial (üblicherweise so genannten Paper Honeycombs, PHCs), der Verzurrung und der entsprechenden Nutzlast.

Im folgenden Artikel werden die im Projekt entwickelten Simulationsmodelle der Lasten sowie relevante Analyseergebnisse vorgestellt. Zu diesem Zweck wurden mehrere Referenzkonfigurationen aufsteigender Komplexität (hier Lastkonfigurationen A - D genannt) implementiert und untersucht.

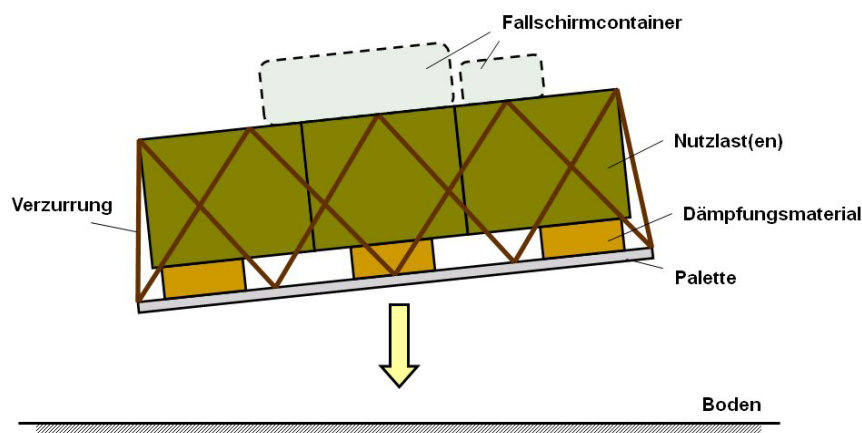


BILD 1 Aufbau und Modellierung einer komplexen Last zum Lastabwurf auf Palette

An diesen Konfigurationen wurden Parametervariation und eine abschließende Bewertung durchgeführt. Dadurch sollen Aussagen zu den Grenzen eines Abwurfverfahrens bzgl. Lage, Geschwindigkeit und der Bodenbeschaffenheit getroffen werden. Ferner wurden Variationen der Positionen des Gurtsystems und der PHC-Blöcke durchgeführt.

In einer ersten Prinzipstudie wird das Kontaktmodell zwischen Boden und Paper Honeycomb als 1-D Bewegung in z-Richtung mit einer Punktmasse modelliert (Lastkonfiguration A). Ausgehend vom Prinzipmodell der PHC-Charakteristik werden zwei im Ansatz der Krafteinleitung unterschiedliche Simulationsmodelle von Lasten auf Paletten aufgebaut und schrittweise in der Komplexität erweitert (Lastkonfiguration B und C). Abschließend wird als Beispiel einer komplexen Last der Abwurf eines Fahrzeugs auf Palette (Lastkonfiguration D) simuliert.

Für die Modellierung und zur Analyse kam das Mehrkörpersimulationswerkzeug SIMPACK zum Einsatz. SIMPACK ist ursprünglich im DLR entstanden [1] und wird seit 2001 von der Firma SIMPACK.AG [2] entwickelt und vertrieben. In der Luftfahrt wird SIMPACK am DLR Institut für Aeroelastik seit langem u. a. für die Analyse von Flugzeug-Bodenlasten [3] sowie für die Simulation von Drehflüglern [4] und Tiltrotor-Flugzeugen [5] genutzt.

Die Arbeiten zum Lastabsetzen wurden im DLR-Projekt Mitrapor 2 durchgeführt. Ziel des Projektes war die umfassende Analyse von Absetzvorgängen von Lasten aus militärischen Transportflugzeugen von dem Moment, an dem die Last das Flugzeug verlässt, über den Entfaltungsvorgang des Fallschirms sowie die Trajektorie der Last bis hin zur Landung. Am Projekt waren das DLR Institut für Flugsystemtechnik, das Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, sowie das Institut für Aeroelastik beteiligt. Eine Übersicht aller Arbeiten in diesem Projekt findet sich in [6].

2. UNTERSUCHUNG DER KONTAKTMODELLE

Anhand der Lastkonfiguration A (ein vertikaler Freiheitsgrad der Last) wurden die erforderlichen Simulationsparameter für die Kontaktmodellierung innerhalb der Mehrkörper-Simulationssoftware SIMPACK modelliert und getestet. Dazu gehört neben den elastisch-plastischen Federelementen der SIMPACK-Bibliothek die resultierenden Bodenparameter wie Steifigkeit und Dämpfung des Bodens.

Beim Absetzen von Lasten wird als Dämpfungsmaterial fast ausschließlich sog. Paper Honeycomb Material (PHC, dt. Wabenpappe) nach MIL-PRF 9884F eingesetzt. Die Standarddicke beträgt dabei 7.5 cm. Um Blöcke größerer Dicke aufzubauen, werden mehrere Lagen übereinander gestapelt und verklebt (z. B. 30 cm = 4 Lagen). Die Materialdicke der Waben beträgt 32 kg/m³, die Druckfestigkeit 300 ± 40 kN/m², die Stauchungsgrenze bei 85 ± 5 %, und die maximal gespeicherte elastische Energie beträgt 8 %.

Die Charakteristik des PHC-Materials wird in einem Feder-Dämpfer-Element mit nichtlinearer Kennlinie und elastisch-plastischen Verformung abgebildet. In Bild 2 ist die Charakteristik des Kraftelements dargestellt. Bei Kompression der Wabenpappe wird das Material zunächst elastisch verformt, bis der elastisch-plastische Grenzwert (Schnittpunkt der roten und schwarzen Linie) erreicht wird. Bei stärkerer Belastung wird das Material entsprechend der Kennlinie plastisch verformt. Die Parameter des Kraft-

elements können frei variiert werden und wurden je nach Abmessung der modellierten Wabenpappe angepasst.

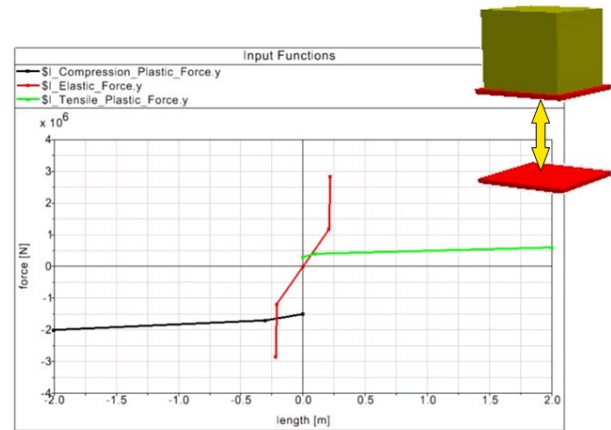


BILD 2 Modellierung des elastisch-plastischen Kraftelements für PHCs

Für eine erste Abschätzung der resultierenden Beschleunigungen durch den Aufprall der Last werden seitens militärischer Vorschriften [7] Handbuchmethoden zur Bestimmung der erforderlichen Fläche und Höhe des Wabenmaterials gegeben. Darin wird folgender Ansatz für die erforderliche Fläche A des Wabenmaterials gemacht:

$$A = \frac{W(G + 1)}{S}$$

Darin entspricht W dem Gewicht in kg, G dem maximal zulässigen Lastvielfachen, sowie S der Druckfestigkeit des Wabenmaterials in kN/m². Bei Verwendung des Wabenmaterials entsprechend der MIL-PRF 9884F ist für eine Masse von 470 kg (Lastkonfiguration A), die ein maximales Lastvielfache von 10g während des Aufpralls nicht überschreiten soll, eine Fläche von 0,169 m² erforderlich.

Für die erforderliche Höhe d des Wabenmaterials bei gegebenem Lastvielfachen und resultierender Aufprallgeschwindigkeit folgt nach [7]:

$$d = \frac{V^2}{2g G \varepsilon_{\max}}$$

mit V als Geschwindigkeit in m/s, der Erdbeschleunigung g in m/s², dem maximalen Lastvielfachen G während des Aufpralls in g, sowie ε_{\max} als Faktor der Stauchungsgrenze des Wabenmaterials. Daraus folgt bei einer Stauchungsgrenze von 85 % und einer maximalen Aufprallgeschwindigkeit von 6.5 m/s eine Mindestdicke des Wabenmaterials von 0.253 m. Unter Berücksichtigung des Wabenmaterials mit einer Höhe von jeweils 7.5 cm pro Wabenpappe, ist für die Aufpralldämpfung von 470 kg mit einer Geschwindigkeit von 6.5 m/s ein Wabenblock mit den Abmessungen 0.4 m x 0.4 m x 0.3 m (L x B x H) ausreichend.

Der resultierende Kraftverlauf während des Aufpralls ist in Bild 3 dargestellt. Darin ist deutlich eine Kraftüberhöhung bis zur plastischen Verformung erkennbar. Nach Erreichen dieser kritischen Knicklast bricht die Kompressionskraft um bis zu 30 % ein und steigt nur anschließend zunächst langsam bis zur Kompressionsgrenze von etwa 85 % an.

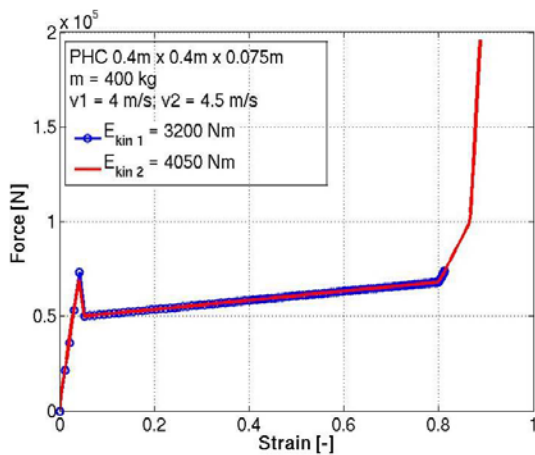


BILD 3 Resultierender Kraftverlauf für ein PHC-Element

Vor dem Erreichen der Kompressionsgrenze ergibt sich wiederum ein starker Kraftanstieg. Bei einer zu geringen Aufprallenergie wird das Wabenmaterial nicht vollständig komprimiert und die Stauchungsgrenze nicht erreicht (blaue Linie), eine zu hohe Aufprallenergie hat einen exponentiellen Kraftanstieg zur Folge. Zu den Eigenschaften von PHC-Elementen siehe auch [8].

Neben dem Kraftelement zur Dämpfung des Aufpralls wird der Kontakt zwischen Boden und Last über klassische Feder-Dämpfer-Elemente realisiert. Dabei wurde der Boden mit einer Steifigkeit von $6,6 \cdot 10^8$ N/m und einer Dämpfung von $0,8 \cdot 10^6$ Ns/m modelliert. Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte charakteristischer Böden zeigen jedoch starke Streuungen bedingt durch Zusammensetzung, Feuchtigkeit und Kompressionsgrad der Böden, siehe z. B. Tabelle 1 aus [9].

Boden	Dichte [kg/m³]	E-Modul [MPa]	Poisson-Zahl (ν)
Clay soil	1900	10-200	k. A.
Sandy soil	1800	10-50	0,25-0,4
Gravel soil	2000	70-170	0,15-0,35
Granite	2700	10000-70000	0,1-0,3
Steel	8000	200000	0,3

Tabelle 1: Typische Werte für die Bodenmodellierung

Im operationellen Einsatz befinden sich Elemente der Wabenpappe mit einer Dicke von 7,5 cm, die entsprechend der gewünschten Aufpralldämpfung zu Wabenblöcken verklebt werden. Es stellt sich dabei die Frage, wie detailliert diese Packung in der Modellierung wiedergegeben werden muss. Für einen Vergleich wurde in der Simulation zum einen ein Wabenblock bestehend aus 4 Schichten à 7,5 cm aufgebaut, zum anderen ein Block aus einer einzelnen Schicht von 30 cm Höhe.

Bild 4 zeigt das Ergebnis der Simulationen. Dargestellt ist das resultierende Lastvielfache für das Vierschichtmodell (schwarz) und das Einschichtmodell (rot).

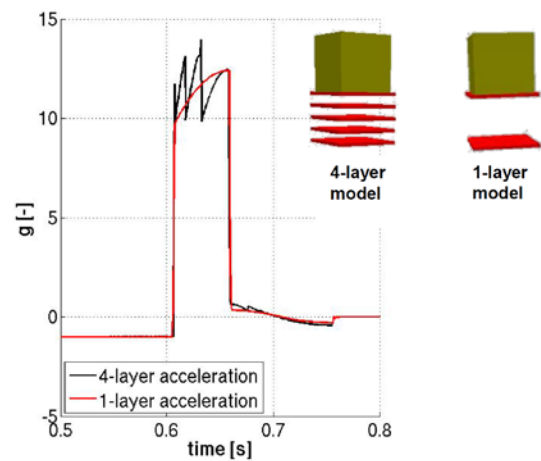


BILD 4 Beschleunigungsverlauf für Landestoß mit Vierschicht- und Einschichtmodell der PHCs

Dabei zeigt sich, dass in der Einzelmodellierung der Waben-schichten die Kompression jeder Schicht abgebildet werden kann (vgl. schwarze Kennlinie). Sobald an einem Punkt innerhalb der Wabenstruktur die kritische Last erreicht ist, wird der Wabenkern komprimiert und der resultierende Krafteinbruch führt zu einer Reduktion der Beschleunigung auf die Masse. Anschließend kommt es zu einem neuerlichen Kraftaufbau entsprechend der Federkennlinie der Wabenelemente bis erneut die kritische Last erreicht wird. Innerhalb der Modellierung des gesamten Wabenblocks sind die einzelnen Beschleunigungsspitzen aufgrund der Kompression der Einzelschichten nicht abgebildet, die globale Beschleunigung der Masse wird allerdings äquivalent wiedergegeben. Aus diesem Grund werden alle folgenden Untersuchungen mit dem Einschichtmodell durchgeführt.

3. EINZELLAST AUF PALETTE

Konfiguration:

Für die Lastkonfiguration B wurde der Komplexitätsgrad der Lastkonfiguration A dahingehend erweitert, dass neben der Stauchung der Wabenblöcke auch eine Scherung in x- bzw. y-Richtung möglich ist.

Des Weiteren wurden 4 der Wabenblöcke unter einer Standardpalette (Eigenmasse der Palette 135 kg) mit einer Last von 2500 kg kombiniert (vgl. Bilder 5 und 6). Dabei handelt es sich um ein System mit 24 Freiheitsgraden. Die Last und die Palette haben jeweils 6 Freiheitsgrade, wohingegen die einzelnen Wabenblöcke nur translatorisch belastet werden können.

Das Gurtsystem der Lastkonfiguration besteht aus nichtlinearen Feder-Dämpferelementen, die unterhalb ihrer Ausgangslänge Kraftfreiheit gewähren. Es wurde angenähert an die Vorschriften mit einer gekreuzten Verspannung modelliert. Ein Kontakt zwischen der Last und dem Gurtsystem ist in dieser Konfiguration nicht modelliert, die Kraftübertragung ist insofern nur über die Krafteinleitungspunkte (Anfangs- und Endpunkte des Gurtsystems) möglich.

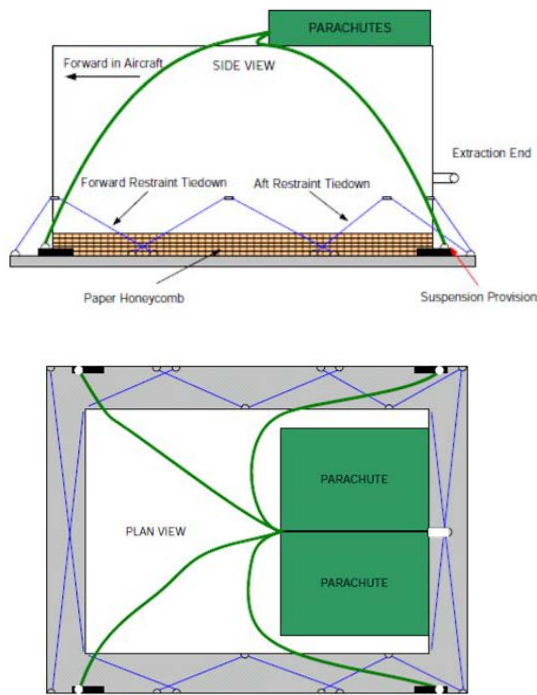


BILD 5 Lastkonfiguration B: Definition und Verzerrung gemäß Spezifikation

Das Gurtsystem erfüllt bei der Simulation im Wesentlichen die Aufgabe, ein Verrutschen der Last gegenüber der Palette zu verhindern, um die Wabenblöcke nach Möglichkeit nur auf Kompression zu belasten und einen einachsigen Spannungszustand im System zu erhalten. Die Spezifikation der Verzerrung ist in [7] dokumentiert. Das Kontaktmodell zwischen Palette und Boden, sowie zwischen Palette und Last ist dabei weiterhin ein Punktkontaktmodell, das an den Eckpunkten der Palette bzw. Mittelpunkten der PHC-Blöcke die Kräfte einleitet.

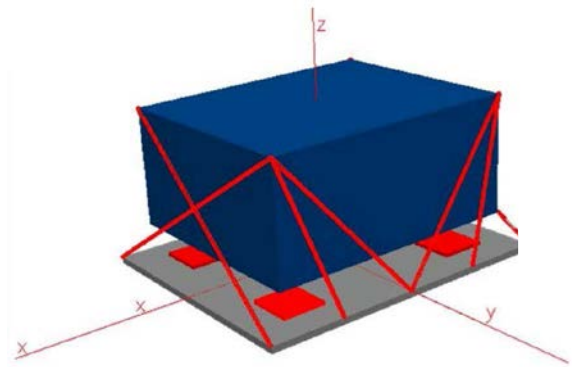


BILD 6 Mehrkörpermodell der Lastkonfiguration B

Landestoßrechnungen:

Erste Landestoßrechnungen wurden anhand der Lastkonfiguration B durchgeführt. Dabei wurde neben der Aufprallgeschwindigkeit in vertikaler Richtung die horizontale Aufprallgeschwindigkeit variiert. In Bild 7 ist der Kraftverlauf innerhalb der einzelnen Wabenblöcke während eines Aufpralls mit einer Geschwindigkeit von 6.5 m/s in horizontaler Richtung und 7 m/s in vertikaler Richtung dargestellt.

Es zeigt sich in der ersten hundertstel Sekunde des Aufpralls eine gleichförmige Belastung der Wabenblöcke und nach $t = 0.66$ s das Erreichen der kritischen Belastungsgrenze.

Der anschließende Krafteinbruch ist gefolgt von einem stetigen Kraftanstieg infolge der Kompression aller Wabenblöcke. Vier hundertstel Sekunden nach dem Aufprall zum Zeitpunkt $t = 0.7$ s werden die hinteren Wabenblöcke infolge der Rotation der Last entlastet und im Gegenzug dazu die vorderen Wabenblöcke stärker belastet. Diese erreichen im weiteren Verlauf des Aufpralls ihre Kompressionsgrenze und führen zu einem weiteren Maximum der auftretenden Beschleunigungskräfte.

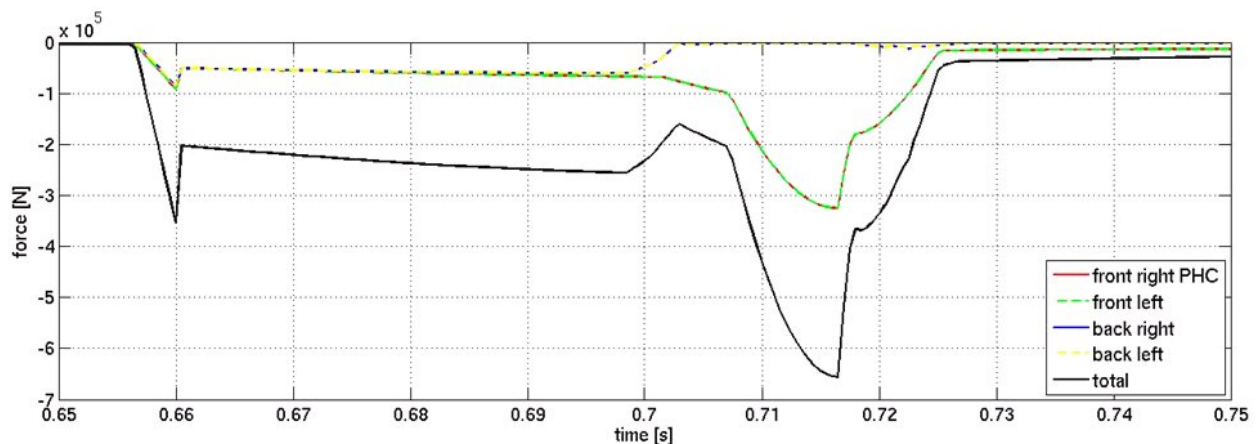


BILD 7 Kraftverlauf in den Wabenblöcken während des Aufpralls der Lastkonfiguration B

Parametervariationen:

Im Rahmen von Parametervariation wurde der Einfluss der Lagewinkel der Last kurz vor dem Aufprall auf die resultierenden vertikalen Beschleunigungen im Referenzpunkt der Last betrachtet. Bild 8 zeigt die Beschleunigung in Abhängigkeit der z-Geschwindigkeit des Aufpralls und des Rollwinkels Φ der Last. Dabei zeigt sich eine gleichbleibend geringe Beschleunigung unterhalb einer für diese Konfiguration spezifischen Grenzggeschwindigkeit. Darüber hinaus tritt ein Versagen der Wabenblöcke ein und führt zu einem starken Anstieg der Beschleunigungskräfte. Dieses Verhalten ist in Bild 8 durch den Beschleunigungsanstieg oberhalb der Vertikalgeschwindigkeit von 6.5 m/s deutlich. Der Einfluss des Lagewinkels ist außerhalb der Nullwinkelage gering.

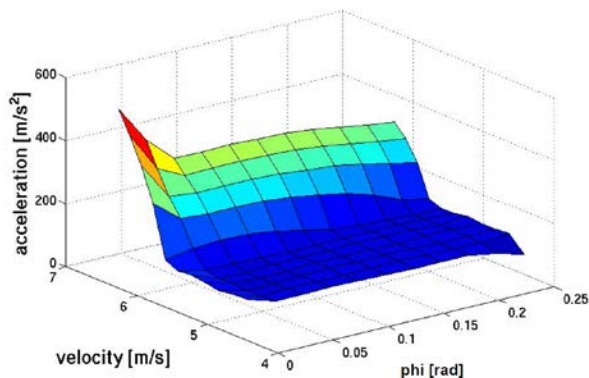


BILD 8 Beschleunigung in Abhängigkeit der vertikalen Geschwindigkeit und des Rollwinkels

Des Weiteren wurde der Einfluss der Schwerpunktlage der Nutzlast auf die maximal auftretenden Beschleunigungen im Lastquader untersucht (Bilder 9 und 10). Dabei wurde, ausgehend vom Mittelpunkt des Lastquaders, der Schwerpunkt um ± 0.3 m in horizontaler und -0.3 m in vertikaler Richtung verlagert und die resultierenden Lastvielfachen während des Aufpralls untersucht, vgl. Bild 9. Die Aufprallgeschwindigkeit lag dabei konstant bei 6.5 m/s mit einer Horizontalgeschwindigkeit von 8 m/s.

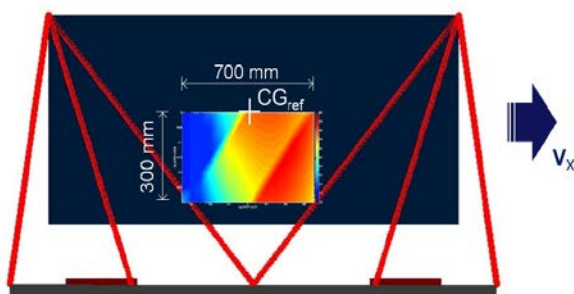


BILD 9 Variation der Schwerpunktlage bei $V_x = 8$ m/s und $V_z = 6,5$ m/s

In Bild 10 ist die maximale Aufprallbeschleunigung (in m/s^2) bis zum 30-fachen der Erdbeschleunigung farblich dargestellt. Dabei heben sich drei Zonen des Aufpralls deutlich hervor, die auch untereinander klar abzugrenzen sind. Zum einen rechts der dunkelrote Bereich oberhalb von 250 m/s^2 , in dem ein Durchschlagen der vorderen Wabenpappe zu sehr hohen Aufprallreaktionen führt, des

Weiteren der mittlere Bereich (orange bis gelb) mit Beschleunigungen zwischen 180 – 250 m/s^2 , in dem die vorderen Waben durch die horizontale Geschwindigkeit stärker belastet werden, aufgrund der Schwerpunktlage die Kompressionsgrenze allerdings nicht erreicht wird. Der dritte Bereich (blau) befindet sich unterhalb von 180 m/s^2 , in dem das System unter diesen Aufprallbedingungen aus Geschwindigkeit und Schwerpunktlage eine geeignete Dämpfung besitzt und die Lastvielfachen 10-15 g nicht wesentlich überschreiten.

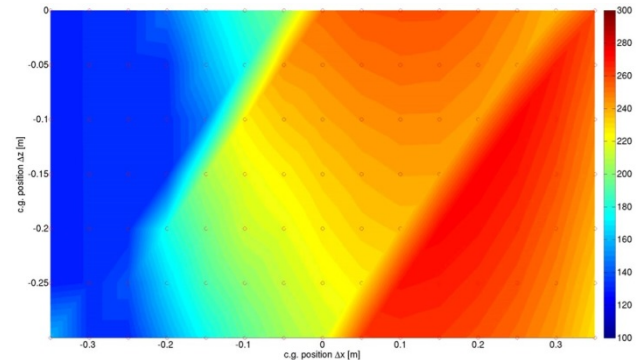


BILD 10 Vertikale Beschleunigungen im Referenzpunkt der Last für unterschiedliche Schwerpunktlagen

4. MEHRFACHE LASTEN AUF PALETTE

Die MKS-Lastkonfiguration C ist eine Erweiterung der vorangegangenen Lastkonfiguration auf die Modellierung mehrerer Lastquader. Die Nutzung eines flächigen Kontaktmodells in SIMPACK erlaubt die automatisierte Erkennung der Durchdringung beliebiger geometrischer Körper. Der Algorithmus bestimmt dazu automatisch den Berührungspunkt zweier Körper und führt entsprechende Kontaktkräfte ein. Dadurch ist es möglich, eine Last bestehend aus mehreren gegeneinander verspannten Körpern zu simulieren, siehe Bild 11 und Referenz [10]. In einer Simulation können nun je nach Körper variierende, realistische Lastvielfache ermittelt werden.

Das Lastvielfache durch den Landestoß auf die einzelnen Lastquader fällt je nach Anordnung der PHC-Wabenblöcke und der Randbedingungen der Landung unterschiedlich aus. Zur Illustration wurden Simulationen mit vier und mit sechs Wabenblöcken durchgeführt. Dabei wurden Aufprallsimulationen mit einer für alle Modelle konstanten vertikalen Landegeschwindigkeit durchgeführt. Variiert wurde die horizontale Landegeschwindigkeit. Zur Bewertung wurde die vertikale Beschleunigung an den jeweils oben und unten liegenden Kisten, vorne sowie hinten, herangezogen. Die Differenz der Lasten zwischen oberen und unteren Kisten (jeweils vorne wie hinten) liegt an der Modellierung der Verzerrung sowie an der bei Konfiguration C möglichen Bewegung der Kisten untereinander.

Deutlich zu sehen ist der Einfluss der Vorwärtsgeschwindigkeit, die durch die Reibung und Bremswirkung der PHC zu einem nickenden Moment führt. Dieses zusätzliche Nickmoment führt bei vier Wabenblöcken dann auch zu höheren vertikalen Lasten bei steigender Vorwärtsgeschwindigkeit (Bild 12).

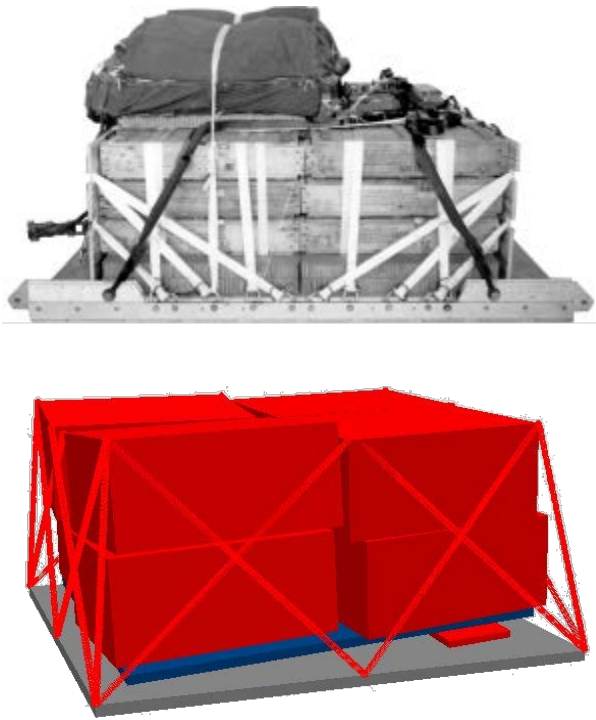


BILD 11 8-foot Typ V Standard-Palette (oben) und MKS-Lastkonfiguration (unten)

Bei sechs unsymmetrisch angebrachten Wabenblöcken (Bild 13) ist die Situation uneinheitlich - bei geringen Vorwärtsgeschwindigkeiten liegen die Lasten auf den vorderen Quaden oberhalb der Lasten auf den hinteren Quaden, da der Kompressionsweg der Waben und damit die mögliche Dämpfungswirkung nicht ausgenutzt wird. Bei höheren Vorwärtsgeschwindigkeiten ändert sich das Verhalten, nunmehr führen die höheren Kräfte zu einem besseren Dämpfungsverhalten durch die doppelten Wabenblöcke.

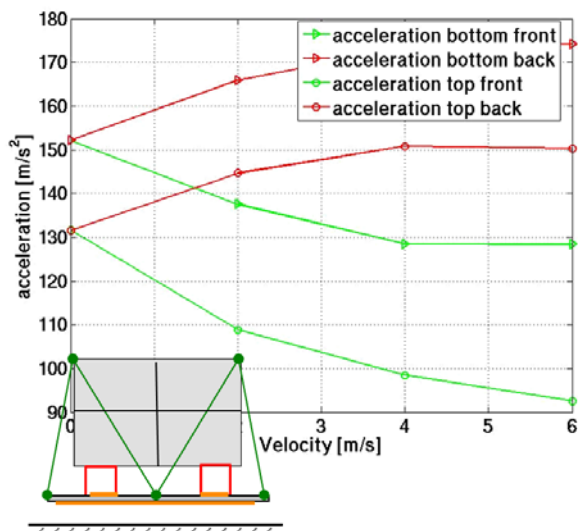


BILD 12 Beschleunigung auf Last mit 4 Wabenblöcken

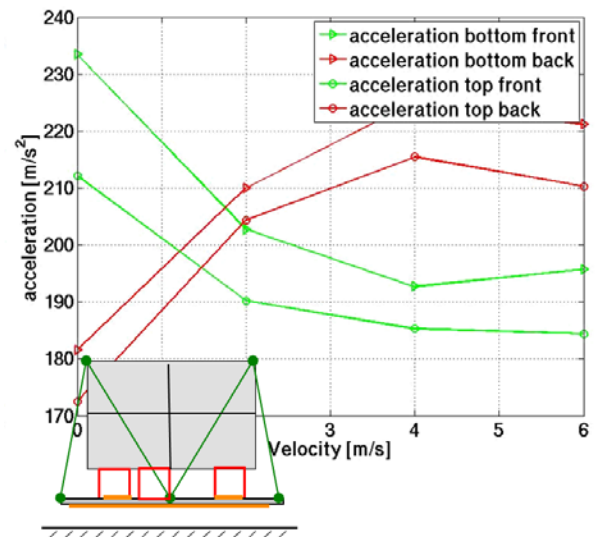


BILD 13 Beschleunigung auf Last mit 6 Wabenblöcken

Diese exemplarischen Ergebnisse zeigen die Notwendigkeit einer sorgfältigen Auswahl der Dämpfungselemente, aber auch die große potentielle Streuung der Lasten durch die unsicheren Rahmenbedingungen.

5. MODELLIERUNG EINES FAHRZEUGS

Zum Abschluss der Arbeiten wurde eine komplexe Lastkonfiguration (Konfiguration D) für den Lastabwurf ausgewählt. Dazu wurde ein generischer Personenkraftwagen betrachtet, der auf einer Palette des Typs Palette 16-foot Typ-V abgeworfen werden kann. Das Mehrkörpermodell ist aus 6 Einzelmassen sowie 4 Einzelradaufhängungen aufgebaut, vgl. Bilder 14 und 15.

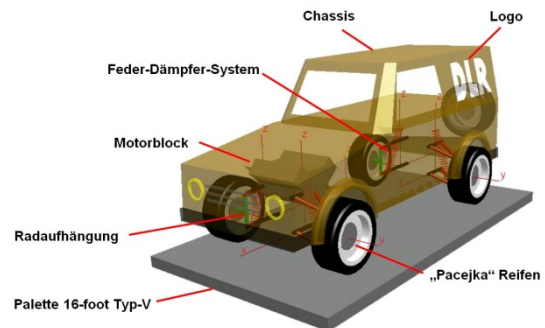


BILD 14 Fahrzeug auf Palette (Ansicht 1)

Die Gesamtmasse des Fahrzeugs beträgt 2.6 t und entspricht damit in etwa der Masse eines kleinen Geländewagens. Der Kontakt zur Palette wird über die Steifigkeitswerte des Reifens umgesetzt. Für die Aufpralldämpfung wurden weitere Wabenblöcke mit verschiedenen Abmessungen modelliert. Zum einen Einzel-Wabenblöcke mit den Abmessungen (L x B) 40 x 40 cm und einer Dicke von A = 15 cm bzw. B = 30 cm, und lange Wabenblöcke von je 190 x 40 cm mit der Dicke B. Die Dämpfungskonfiguration für die komplexe Last ist mit einer Gesamthöhe von 45 cm modelliert. Sie besteht links und rechts aus zwei langen Wabenblöcken der Dicke B, und an deren vorderem und hinterem Ende ein kleiner Wabenblock der Höhe A aufgesetzt ist. Des Weiteren besteht das Dämpfungsmaterial aus Paarungen aus je einem dünnen und einem dicken Wabenblock mit den Abmessungen 40 x 40

cm am Heck, in der Mitte und unterhalb des Motorblocks. Die Verzerrung für die Lastaufpralldämpfung ist den Vorschriften nachempfunden, vgl. Abbildung 15, und dient wie in der vorangegangenen Modellierung zur Verbesserung der Krafteinleitung in die Wabenblöcke. Ein Kontakt der Verzerrung mit Teilen der Last wird nicht berücksichtigt.

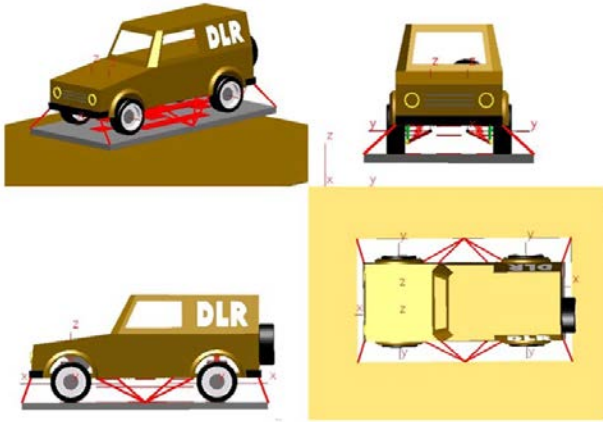


BILD 15 Fahrzeug auf Palette (Ansicht 2)

Der Aufprall der Lastkonfiguration D wurde mit einer Geschwindigkeit von 7.5 m/s simuliert. Dies führt zu einem resultierenden Lastvielfachen von ca. 30 g am Schwerpunkt des Chassis. Kritisch für diese Form der Lastkonfiguration ist die Massenkonzentration im vorderen Teil durch den Motor und das Getriebe des Fahrzeugs. Dieses führt zu sehr hohen Aufprallkräften, daher wird in diesem Bereich der Konfiguration zusätzlich Wabenpappe angebracht. In der Modellierung findet der Kontakt im Gegensatz zur realen Lastkonfiguration an der Unterseite des Chassis statt. Dennoch ist diese Form der Modellierung geeignet, die grundsätzliche Wirkweise der Aufpralldämpfung darzustellen und ggf. Änderungen an der Wabenposition und der daraus resultierenden Beschleunigung, auch auf Komponenten des Fahrzeugs, zu modellieren. Das resultierende Lastvielfache am Motorblock ist in Bild 16 dargestellt.

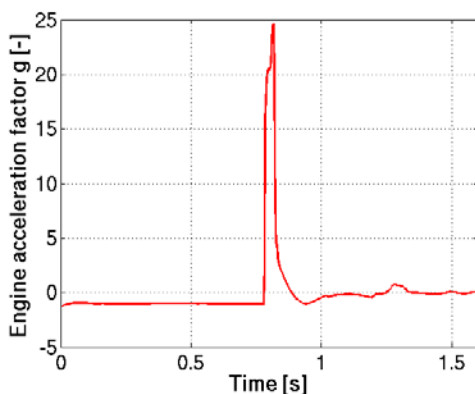


BILD 16 Lastvielfaches am Motor

Die Radaufstandskräfte, Bild 17, zeigen für den ebenen Aufprall mit 7.5 m/s keine Unterschiede zwischen der linken und der rechten Fahrzeugseite. Aufgrund des zunächst aufgebockten Fahrzeugs sind die Reifenkräfte bis zum Aufprall sehr klein, erst die Kompression der Wabenpappe führt zu einer deutlichen Belastung der Reifen.

Kurzzeitig treten hier Kräfte des 13-fachen der normalen Radaufstandskraft von etwa 6400 N auf.

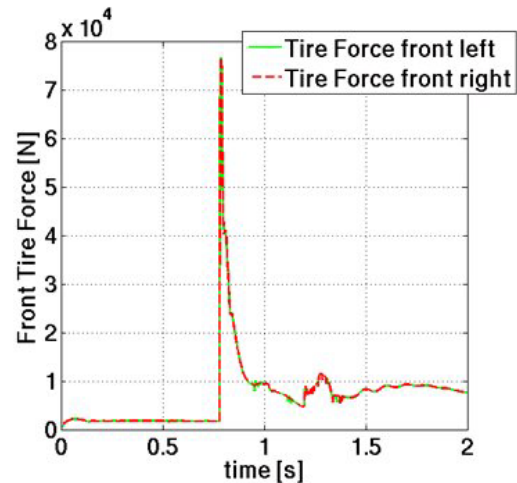


BILD 17 Radaufstandskraft beim Aufprall

6. ZUSAMMENFASSUNG UND BEWERTUNG

Anhand von verschiedenen Lastkonfigurationen wurde in der MKS-Simulationsumgebung SIMPACK der Lastaufprall simuliert. Dazu wurden Modelle mit unterschiedlichem Komplexitätsgrad modelliert und anschließend im Zeitbereich verschiedene Aufprallszenarien simuliert. Anhand der ersten Studien der Lastkonfiguration A wurde gezielt das Verhalten der Wabenblöcke untersucht und das globale Verhalten in guter Näherung modelliert. Dabei zeigt sich, dass eine zusammenfassende Modellierung mehrerer Wabenschichten zu guten Ergebnissen für die globalen Kräfte und Beschleunigungen der Lasten führt. Für eine Untersuchung des Kompressionsverhaltens auf lokaler Ebene bzw. die Reaktion der Wabenblöcke während des Aufpralls muss an dieser Stelle auf höherwertigere FE-Methoden verwiesen werden, die das Kompressionsverhalten von Wabenblöcken gezielt untersuchen.

Anhand der Lastkonfiguration B konnten zahlreiche Simulationen durchgeführt werden. Dabei standen die Reaktion der Last und die resultierende Beschleunigung im Vordergrund des Interesses. Es hat sich gezeigt, dass der Zusammenhang von resultierender Beschleunigung zu Höhe und Fläche der Wabenblöcke von den analytischen Annahmen in guter Näherung zutrifft. Lokale Effekte, wie beispielsweise einzelne Beschleunigungsspitzen oder die resultierenden Beschleunigungen unterschiedlichen Positionen der Last, werden hingegen nicht abgedeckt und machen separate Analysen für jede Lastkonfiguration erforderlich. Insbesondere die Simulation mehrerer Lastkörper, wie in Lastkonfiguration C umgesetzt, zeigt eine starke Wechselwirkung der Einzelmassen und lässt eine generelle Formulierung zur Anordnung der Wabenblöcke nicht zu. Im Allgemeinen hat sich jedoch gezeigt, dass eine bloße Erhöhung der Anzahl der Wabenblöcke nicht mit einer generellen Reduktion der Beschleunigungskräfte einhergeht, sondern die Anzahl der Wabenblöcke je nach Konfiguration und erwarteter Aufprallgeschwindigkeit angepasst werden muss, um eine optimale Dämpfung der Last zu erreichen.

Anhand der Lastkonfiguration D wurde abschließend eine komplexe Last simuliert. Darin wurde neben der resultierenden Beschleunigung auf die Last, örtliche Beschleunigungen und die resultierende Radstandskraft betrachtet. Aufgrund der Komplexität wurde diese Lastkonfiguration im Wesentlichen zu Demonstrationszwecken modelliert und dient zum Aufzeigen des Potentials der bisher entwickelten MKS-Aufprallmodelle. Für umfangreiche Parameterstudien kann das generische Fahrzeug durch ein realistisches Modell ersetzt werden.

In der MKS-Software SIMPACK konnte eine Basis zur Modellierung komplexer Aufprallvorgänge mit verschiedenen Lastkonfigurationen erstellt werden. Die Software bietet mit ihren Bibliothekselementen für elastisch-plastische Verformung sowie mit den unterschiedlichen Formulierungen für punktuellen und flächigen Kontakt gute Voraussetzungen für realistische Analysen. Dies ermöglicht Betrachtungen für neue Konfigurationen im Lastabwurf, um zusätzlich zur experimentellen Validierung von Abwurfsszenarien erste Lastabschätzungen anhand von numerischen Voruntersuchungen treffen zu können.

7. DANKSAGUNG

Die Arbeiten entstanden im DLR-Projekt Mitrapor 2. Die Autoren bedanken sich bei allen Kollegen, die am Projekt beteiligt waren, für die gute Zusammenarbeit. Der Dank gilt insbesondere dem Projektleiter Thomas Jann für die große Unterstützung im Projekt sowie bei der Veröffentlichung der Ergebnisse.

8. LITERATUR

- [1] M. Arnold, O. Vaculín, (eds.): Multibody System Simulation in Vehicle System Dynamics. To the memory of Willi Kortüm (1938 - 2002). Special issue of Vehicle System Dynamics, Volume 41, Number 5, pp. 335-429, 2004.
- [2] <http://www.simpack.com>, zuletzt aufgerufen am 1.9.2015.
- [3] M. Spieck: Ground Dynamics of Flexible Aircraft in Consideration of Aerodynamic Effects. Dissertation an der Technischen Universität München. Juli 2004.
- [4] J. Arnold: Using multibody dynamics for the simulation of flexible rotor blades - Modelling of an innovative blade layout based on beam approach. In: Proc. ERF 2010 - 36th European Rotorcraft Forum, 07-09 Sept. 2010, Paris, France.
- [5] Wolf R Krüger: Multibody analysis of whirl flutter stability on a tiltrotor wind tunnel model. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics. Sage, London. doi: 10.1177/1464419315582128. Published online before print, May 7, 2015.
- [6] T. Jann, S. Geisbauer, N. Bier, W. Krüger, H. Schmidt: Multi-Fidelity Simulation of Cargo Airdrop: From the Payload Bay to the Ground. Proc. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, Aviation Forum 2015, Dallas, TX, June 2015.
- [7] Commonwealth of Australia, Australian Defence Standard, Department of Defence, DEF(AUST) 9009A, Specification, Designing for Aerial Delivery of Equipment by Fixed and Rotary Wing Aircraft, 2009.
- [8] Lassat, Y., Simulation of the impact on ground of airdrop loads to define a standard worst case test, 6th European LS-DYNER Users' Conference, 2005.
- [9] Stanford University, Some Useful Numbers on the Engineering Properties of Materials, www.stanford.edu/~tyzhu/Documents/, 2013.
- [10] United States, Headquarters Department of the Army, Airdrop of Supplies and Equipment: Rigging containers, FM 4-20.103 (FM 10-500-3), Washington, 2005.